

## Wykorzystanie kopalnych paliw gazowych do poprawy efektywności produkcji energii ze źródeł odnawialnych

### The use of fossil gas fuels to improve the efficiency of energy production from renewable sources

Zdzisław Gebhardt, Robert Wojtowicz

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Odnawialne źródła energii (wiatr, słońce, biogaz) charakteryzują się przeważnie niestabilnością ich pozyskiwania, co bardzo obniża dyspozycyjność systemów produkujących na ich bazie energię. Prowadzi to do sytuacji, że systemy te nie mogą być wykorzystywane jako w pełni samodzielne źródło energii dla zaspokojenia lokalnych potrzeb energetycznych. W artykule przedstawiono różne metody wspomagania układów energetycznych zasilanych z odnawialnych źródeł energii za pomocą układów zasilanych gazem ziemnym, LNG lub gazami płynnymi propan-butan. Przedstawiono symulacje wyrównywania parametrów energetycznych biogazu z biogazowni rolniczych i komunalnych stosowanych do zasilania układów kogeneracyjnych oraz symulacje pracy układów gazowo-wiatrowych i gazowo-solarnych (fotowoltaika). W wyniku tego wspomagania uzyskuje się efekt synergii polegający na wzmocnieniu pozycji rynkowej energii ze źródeł odnawialnych poprzez zwiększenie pewności i stabilności jej dostarczania. Z drugiej strony istnieje możliwość lokalnego wykorzystania gazów kopalnych (w tym gazów odbiegających jakością od wymagań stawianych gazom sieciowym) w układach, w których cena wyprodukowanej energii jest niższa niż w przypadku układów samodzielnych. W artykule przedstawiono przykładowe obliczenia opłacalności ekonomicznej dla wyżej wspomnianych układów energetycznych dla różnych warunków uzyskiwania odnawialnych źródeł energii. Jakkolwiek opłacalność układów składających się z elektrowni wiatrowych i gazowych urządzeń kogeneracyjnych jest silnie uzależniona od warunków pracy takich układów, tak wspomaganie biogazowni gazami z lokalnych źródeł gazu ziemnego, których opłacalność włączenia do sieci kwestionowana ze względu na słabą wydajność źródła i konieczność dostosowania jego jakości do parametrów sieciowych, jest w pełni uzasadniona i opłacalna. Przedstawione w artykule badania pokazały, że popularne domowe urządzenia gazowe mogą być bezpiecznie użytkowane w stosunkowo dużym zakresie zmienności parametrów zasilającego je gazu, co pozwala na efektywne użytkowanie różnych mieszanin biogazu z gazami kopalnymi.

Słowa kluczowe: OZE, odnawialne źródła energii, efektywność, synergia, gazy kopalne, rynek energii.

**ABSTRACT:** Renewable energy sources (wind, solar, biogas) are characterized mainly by the instability of their acquisition, which greatly reduces the quality of production systems producing energy based on them. This leads to the situation that these systems cannot be used as a fully independent source of energy to meet local energy needs. The paper presents various methods of supporting energy systems powered by RES supported by natural gas, LNG or LPG. Simulations were presented of balancing the energy parameters of biogas from agricultural biogas plants and municipal waste used for power cogeneration systems and simulations of operating systems the gas – wind turbines and the gas-solar (photovoltaics) system. As a result of this support, a synergy effect is achieved which, on the one hand, reinforces the market position of energy from renewable sources by increasing the stability and certainty of its delivery; on the other hand, there is the possibility of using fossil gases locally (including the gas that does not meet the quality requirements laid on network gases) in systems where the price of generated energy is lower than in case of stand-alone systems. The article presents exemplary calculations of economic viability for the aforementioned energy systems for different conditions for obtaining renewable energy sources. However, the profitability of the systems consisting of wind farms and gas cogeneration plants is strongly dependent on the working conditions of such systems, thus assisting biogas plants with gas from local sources of gas, whose viability is questioned due to the poor efficiency of the source, and the need to adjust its quality to the network parameters, is fully justified and profitable. The research presented in the article showed that popular home gas appliances can be safely used in a relatively large range of variability of the gas supplying them, which allows the effective use of various biogas mixtures with fossil gases.

Key words: RES, renewable energy sources, efficiency, synergy, fossil gases, energy market.

Autor do korespondencji: Z. Gebhardt, e-mail: [zdzislaw.gebhardt@inig.pl](mailto:zdzislaw.gebhardt@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji 15.02.2019 r. Zatwierdzono do druku 5.06.2019 r.

**Wstęp**

Konieczność ochrony środowiska i oszczędzania energii jest działaniem wynikającym nie tyle z efektu cieplarnianego, co do którego istnieją kontrowersje dotyczące wpływu człowieka na ten proces, ile z prostej kalkulacji zasobów w odniesieniu do wzrastającej stale liczby ludności na świecie. Sytuacja ta zmusza nas do myślenia nad wykorzystaniem tego, co daje nam natura w ilościach przekraczających nasze potrzeby – oczywiście chodzi o odnawialne źródła energii (OZE). Jak wspomniano wyżej OZE są praktycznie niewyczerpywalne, ale mają jedną zasadniczą wadę – dostarczają energię nieregularnie, nie tam gdzie byśmy akurat chcieli lub nie o tym czasie, który byłby dla nas optymalny. Mówiąc ogólnie OZE są stosunkowo mało sterowalne, co obniża ich walory użytkowe. Aby ten stan poprawić mamy praktycznie dwa wyjścia:

- zwiększenie możliwości produkcyjnych OZE do takiego poziomu, aby przeciętna moc uzyskiwana zapewniała pełne zapotrzebowanie na moc użytkową, co wiąże się z dużymi kosztami, lub
- dostosowanie maksymalnej podaży mocy z OZE do przeciętnego popytu na moc użytkową i wyrównywanie brakującej podaży mocy w odniesieniu do aktualnego popytu za pomocą łatwo sterowalnych źródeł energii.

Odpowiednio skonfigurowana synergia tych dwóch źródeł energii pozwala na uzyskanie układu gwarantującego stabilne dostawy energii do odbiorców końcowych. Z punktu widzenia efektywności ekonomicznej, możliwości szybkiego ich uruchomienia oraz łatwości ich dostosowania do aktualnych potrzeb odbiorców najlepszym rozwiązaniem są urządzenia zasilane LNG lub LPG. Wykorzystanie LNG i LPG do stabilizowania parametrów biogazu zostało już przedstawione (Wojtowicz, 2014). W niniejszym artykule odniesiono się natomiast do wykorzystania w tym celu pozaklasowych gazów z separacji gazu surowego uzyskiwanych z lokalnych źródeł.

W 2017 r. moc zainstalowana w Krajowym Systemie Energetycznym wyniosła 43 421 MW, a moc osiągalna – 43 332 MW. Wielkość udziału źródeł energii pochodzących z OZE (URE, 2018) przedstawiono w tabeli nr 1.

W kolejnych punktach przedstawione zostaną symulacje współdziałania urządzeń kogeneracyjnych zasilanych różnymi gazami ze źródłami OZE.

**Energia wiatru + energia gazu**

Z każdym rokiem ilość pracujących w Polsce elektrowni wiatrowych systematycznie wzrasta, chociaż jak widać z prezentowanego powyżej raportu URE (URE, 2018) przyrosty te są coraz mniejsze. Obecnie udział energii wiatrowej w ogólnym bilansie mocy zainstalowanych w Polsce kształtuje się na poziomie 13,5%. Budowane są zarówno pojedyncze jednostki o mocach od kilku kW do 1 MW, jak i duże instalacje składające się z kilku lub kilkunastu turbin, których sumaryczna moc elektryczna dochodzi do kilkudziesięciu lub nawet przekracza 100 MW. Instalacje takie noszą nazwę farm wiatrowych. O opłacalności elektrowni wiatrowych w pierwszym rzędzie decyduje lokalizacja instalacji. Wybór miejsca jest niezwykle ważny, gdyż stanowi podstawę, aby turbina pracowała efektywnie. O wyborze miejsca posadowienia elektrowni wiatrowej powinny decydować głównie warunki wietrzne. Różne typy elektrowni do produkcji prądu wymagają innej siły wiatru do rozruchu. Jedne zaczynają produkcję prądu już od 3,5 m/s, a inne do rozpoczęcia pracy potrzebują wiatru o prędkości 5 m/s. Decydujące są również takie czynniki, jak: ilość generatorów, rozpiętość łopat i wysokość wieży.

W Polsce średnia roczna prędkość wiatrów waha się od 2,8 do 3,5 m/s. Średnie roczne prędkości powyżej 4 m/s (wartość minimalna do efektywnej pracy elektrowni wiatrowej) występują na wysokości 25 m i powyżej na 2/3 powierzchni naszego

**Tabela 1:** Bilans OZE w Krajowym Systemie Energetycznym

**Table 1.** RES balance in the National Energy System

| Rodzaj instalacji OZE                       | Moc zainstalowana [MW]<br>według stanu na 30.06.2018 r. |          |          |          |          |          |          |
|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|   | Lata  |          |          |          |          |          |          |
|   | 2012  | 2013     | 2014     | 2015     | 2016     | 2017     | 2018     |
| Biogazownie                                 | 131,247   | 162,241  | 188,549  | 212,497  | 233,967  | 235,373  | 240,968  |
| Instalacje na biomasę                       | 820,700   | 986,873  | 1008,245 | 1122,670 | 1281,065 | 1362,030 | 1363,670 |
| Instalacje wykorzystujące energię słoneczną | 1,290   | 1,901    | 21,004   | 71,031   | 99,098   | 103,896  | 126,001  |
| Elektrownie wiatrowe                        | 2496,748  | 3389,541 | 3833,832 | 4582,036 | 5807,416 | 5848,671 | 5874,778 |
| Elektrownie wodne                           | 966,103   | 970,128  | 977,007  | 981,799  | 993,995  | 988,377  | 979,135  |
| Łącznie                                     | 4416,088  | 5510,684 | 6028,637 | 6970,033 | 8415,541 | 8538,347 | 8584,552 |
| Wzrost r/r                                  |   | 1094,596 | 517,953  | 941,396  | 1445,508 | 122,806  | 46,205   |

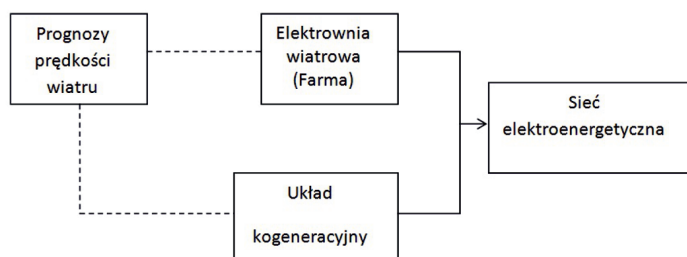
kraju. Prędkości powyżej 5 m/s występują na niewielkim obszarze i to na wysokości 50 metrów i powyżej. Uważa się, że na 1/3 powierzchni Polski istnieją odpowiednie warunki do rozwoju energetyki wiatrowej. W Polsce przy obecnych warunkach ekonomicznych i technicznych za teren przydatny do wykorzystania energii wiatru uznaje się taki, dla którego średnia roczna prędkość wiatru na wysokości 70 m jest nie mniejsza niż 6 m/s (Soliński et al., 2008).

Okresowość pracy elektrowni wiatrowej wynikająca ze zmiennych warunków wietrznych doprowadziła do tego, iż powstała idea łączenia elektrowni wiatrowej z innymi źródłami energii elektrycznej w tzw. elektrownie hybrydowe.

Pojęcie elektrowni hybrydowej odnosi się do jednostki wytwórczej, wytwarzającej energię elektryczną lub energię elektryczną i ciepło, w której w procesie wytwarzania energii wykorzystywane są dwa lub więcej odnawialne źródła energii lub drugim źródłem energii jest instalacja zasilana gazem ziemnym. Przykładem są:

- elektrownia wiatrowa – elektrownia słoneczna – agregat prądowców;
- elektrownia wiatrowa – elektrownia szczytowo-pompowa;
- elektrownia wiatrowa – układ kogeneracyjny zasilany gazem;
- elektrownia wiatrowa – ogniwo paliwowe;
- elektrownia zasilana paliwem węglowym – elektrownia zasilana biopaliwem

Schemat elektrowni wiatrowo-gazowej pokazano na rysunku 1. W skład takiej jednostki wytwórczej wchodzi elektrownia lub farma wiatrowa oraz silnik gazowy, podłączone do sieci energetycznej. Silnik gazowy jest zasilany gazem ziemnym. Sercem systemu jest układ sterowania, który w oparciu o prognozy prędkości wiatru lub bieżące pomiary prędkości wiatru steruje pracą obu źródeł energii, w szczególności pracą silnika gazowego.



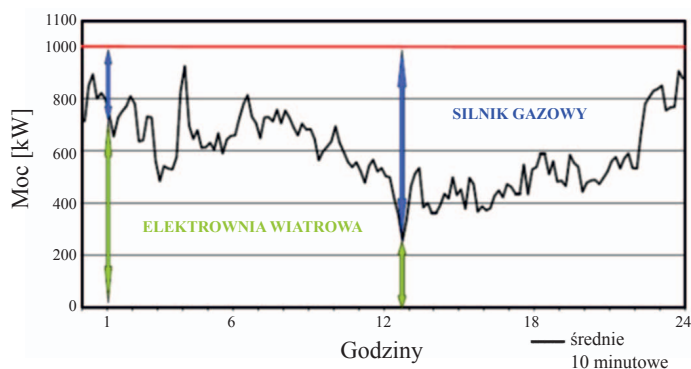
Rys. 1. Schemat elektrowni wiatrowo-gazowej

Fig. 1 Diagram of a wind-gas power plant

Biorąc pod uwagę, że farma wiatrowa działa na rynku bilansującym zapotrzebowanie na energię elektryczną i jej wytwarzanie w krajowym systemie energetycznym, musimy się liczyć z koniecznością **grafikowania** (przedstawianie prognozy w wersji graficznej) przewidywanej do wytworzenia energii z 24-godzinnym wyprzedzeniem.

Właśnie wymóg o grafikowaniu wytworzonej energii z 24-godzinnym wyprzedzeniem przemawia za tworzeniem elektrowni **hybrydowych** z wykorzystaniem jako drugiego źródła energii elektrycznej układów zasilanych gazem. Układy te mają krótki czas rozruchu i mogą bardzo szybko przejąć produkcję energii zamiast elektrowni wiatrowej w momencie zaniku lub zbyt dużej siły wiatru, co może zezwolić na uniknięcie grafikowania lub wzmocnić poprawność grafikowania. Możemy zatem wyróżnić dwie metody bilansowania zapotrzebowania na energię elektryczną:

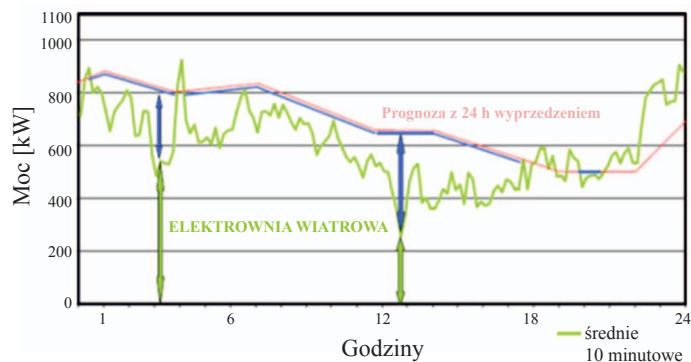
- moc uzyskiwana z elektrowni wiatrowej jest uzupełniana przez wspomagający układ kogeneracyjny gazowy do wielkości znamionowej mocy. Taką metodę pokazano na rysunku 2. **Prognoza 24-godzinna warunków wiatrowych nie jest wymagana.** Deklarowana jest stała moc zespołu hybrydowego – brak konieczności grafikowania.



Rys. 2. Uzupełnianie do wielkości znamionowej mocy (Soliński et al., 2008)

Fig. 2. Refilling to value of the power rating

- moc uzyskiwana z elektrowni wiatrowej jest **uzupełniana** przez wspomagający silnik gazowy **do wielkości grafikowanych prognoz**. Ten sposób bilansowania pokazuje rysunek 3. Metoda wymaga trudnej do uzyskania prognozy warunków wiatrowych (24 godzinnej). Danych takich może dostarczyć jedynie profesjonalna



Rys. 3. Uzupełnianie do wielkości prognoz (Soliński et al., 2008)

Fig. 3. Refilling to the size of forecasts

stacja meteorologiczna dysponująca odpowiednim sprzętem pomiarowym oraz zdjęciami satelitarnymi (obserwacja przemieszczania frontów powietrza itp.). Silnik gazowy w takiej elektrowni hybrydowej pracuje z mniejszą mocą wyjściową i w krótszych przedziałach czasu niż w przypadku poprzednim.

W poniższych analizach przyjęto, że elektrownia hybrydowa będzie pracować do wielkości znamionowej mocy, czyli według wykresu pokazanego na rysunku 2. Oznacza to, iż moc elektryczna układu skojarzonego musi być równa mocy nominalnej elektrowni hybrydowej. Układ ten pozwala na większy udział energii z gazu oraz na uniknięcie kosztów związanych z prognozowaniem i grafikowaniem.

Analizując pracę elektrowni hybrydowych pod kątem ich opłacalności ekonomicznej rozpatrzono cztery warianty pracy dla następujących mocy elektrowni, tzn. dla 1, 2, 4, 6, 8, 10 MW. W artykule przedstawiono wyniki dla mocy 4 i 8 MW.

Do analizy kosztów wykorzystano ceny certyfikatów i energii z roku 2011 oraz dostępne w tym czasie koszty inwestycyjne w oparciu o dane producentów.

#### **Wariant 1**

Elektrownia zbudowana jest tylko w oparciu o turbinę wiatrową, która produkuje energię elektryczną. Produkcja energii elektrycznej przebiega wg krzywej zasobów energii dla danej turbiny. Rozpatrzono pracę turbiny wiatrowej przy trzech średnich prędkościach wiatru: 5, 6 i 7 m/s. Przychody przedsiębiorstwa pochodzą ze sprzedaży energii elektrycznej oraz zielonych certyfikatów.

#### **Wariant 2**

Elektrownia zbudowana jest w oparciu o turbinę wiatrową oraz układ kogeneracyjny oparty na silniku spalinowym zasilanym gazem ziemnym wysokometanowym. Turbina wiatrowa produkuje energię elektryczną wg krzywej zasobów energii dla danej turbiny. Pozostała część energii elektrycznej do wysokości zaprojektowanej mocy elektrowni hybrydowej produkowana jest przez układ kogeneracyjny. W wariantcie 2 nie ma wykorzystania ciepła wyprodukowanego w gazowym układzie skojarzonym, które jest odprowadzane do atmosfery w chłodniach wentylatorowych. Przychody przedsiębiorstwa pochodzą ze sprzedaży energii elektrycznej oraz zielonych certyfikatów odpowiadających ilości energii elektrycznej wyprodukowanej w turbinie wiatrowej.

#### **Wariant 3**

Elektrownia zbudowana jest w oparciu o turbinę wiatrową oraz układ kogeneracyjny oparty na silniku spalinowym zasilanym gazem ziemnym wysokometanowym. Turbina wiatrowa produkuje energię elektryczną wg krzywej zasobów energii

dla danej turbiny. Pozostała część energii elektrycznej do wysokości zaprojektowanej mocy elektrowni hybrydowej produkowana jest przez układ kogeneracyjny. W wariantcie 3 wyprodukowane ciepło jest wykorzystane na poziomie 80%, np. jako ciepło do procesów technologicznych w zakładach przemysłowych. Przychody przedsiębiorstwa pochodzą ze sprzedaży energii elektrycznej, zielonych certyfikatów odpowiadających ilości energii elektrycznej wyprodukowanej w turbinie wiatrowej (OZE), energii cieplnej oraz żółtych certyfikatów odpowiadających ilości energii elektrycznej wyprodukowanej w wysokosprawnej kogeneracji.

#### **Wariant 4**

Elektrownia zbudowana jest w oparciu o turbinę wiatrową oraz układ kogeneracyjny oparty na silniku spalinowym zasilanym gazem ziemnym wysokometanowym. Turbina wiatrowa produkuje energię elektryczną wg krzywej zasobów energii dla danej turbiny. Pozostała część energii elektrycznej do wysokości zaprojektowanej mocy elektrowni hybrydowej produkowana jest przez układ kogeneracyjny. W wariantcie 4 wyprodukowane ciepło jest wykorzystane na cele grzewcze w ilości wynikającej z ilości stopniodni grzewczych dla przyjętego obszaru. Przychody przedsiębiorstwa pochodzą ze sprzedaży energii elektrycznej, zielonych certyfikatów odpowiadających ilości energii elektrycznej wyprodukowanej w turbinie wiatrowej (OZE), energii cieplnej oraz żółtych certyfikatów odpowiadających ilości energii elektrycznej wyprodukowanej w wysokosprawnej kogeneracji.

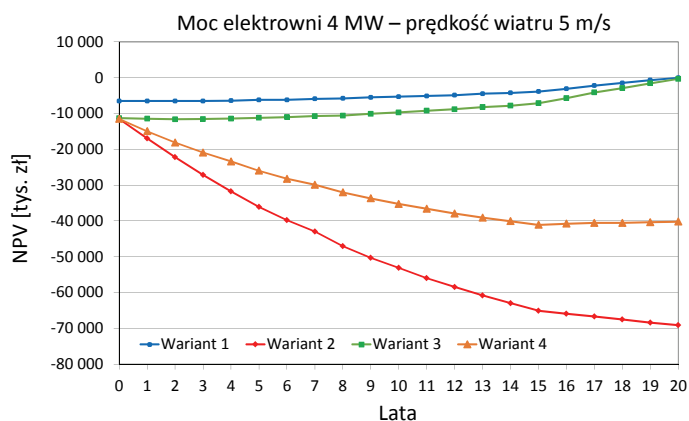
Na rysunkach 4–6 przedstawiono przykładowe wykresy efektywności ekonomicznej pracy elektrowni.

### **Analiza wyników**

Analizując wyniki przeprowadzonych obliczeń dla elektrowni wiatrowej oraz elektrowni hybrydowej zbudowanej w oparciu o turbinę wiatrową i układ kogeneracyjny zasilany gazem ziemnym wysokometanowym można stwierdzić, że:

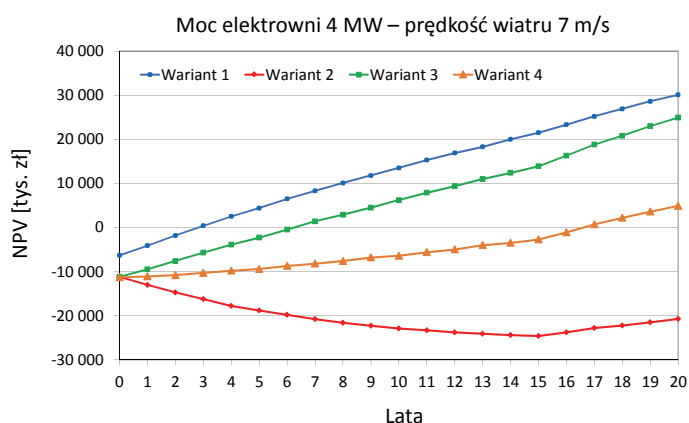
- opłacalność ekonomiczna, określana na podstawie dodatniej wartości bieżącej netto (NPV – *Net Present Value*) zarówno samych elektrowni wiatrowych, jak i elektrowni hybrydowych bardzo silnie zależy od średniej prędkości wiatru w miejscu ich zainstalowania. Obserwując wykresy NPV w funkcji lat pracy sporządzone dla wszystkich rozpatrywanych mocy wyraźnie widać, że przy prędkości wiatru 5 m/s żadna elektrownia wiatrowa nie jest opłacalna. Dopiero przy średniej prędkości wiatru 6 m/s wszystkie rozpatrywane elektrownie wiatrowe przyniosą dodatni efekt ekonomiczny. NPV jest większe od zera, IRR w każdym przypadku jest wyższe od stopy dyskonta. Również





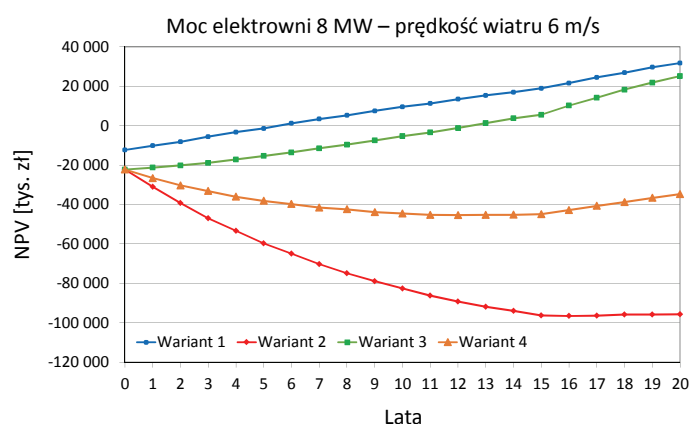
Rys. 4. NPV w funkcji lat pracy dla przyjętych wariantów – moc elektrowni 4 MW prędkość wiatru 5 m/s

Fig. 4. NPV as a function of working years for accepted variants – power of 4 MW power plant wind speed 5 m/s



Rys. 5. NPV w funkcji lat pracy dla przyjętych wariantów – moc elektrowni 4 MW prędkość wiatru 7 m/s

Fig. 5. NPV as a function of working years for accepted variants – power of 4 MW power plant wind speed 7 m/s



Rys. 6. NPV w funkcji lat pracy dla przyjętych wariantów – moc elektrowni 8 MW prędkość wiatru 6 m/s

Fig. 6. NPV as a function of working years for accepted variants – power of 8 MW power plant wind speed 6 m/s

w przyjętym okresie eksploatacji elektrowni nastąpi zwrot zainwestowanego kapitału własnego (zdyskontowany czas zwrotu kapitału własnego jest krótszy niż przewidziany czas eksploatacji). W przypadku, gdy średnia prędkość wiatru wzrośnie do 7 m/s opłacalność elektrowni wiatrowych jeszcze bardziej się poprawia.

- w przypadku elektrowni hybrydowej pracującej według wariantu 2, gdy nie ma wykorzystania ciepła wyprodukowanego w układzie kogeneracyjnym i jest ono wyprowadzane do atmosfery w chłodniach wentylatorowych to w żadnym przypadku układ nie osiągnął dodatniego efektu ekonomicznego (nawet przy średniej prędkości wiatru 7 m/s).
- w przypadku elektrowni hybrydowej pracującej według wariantu 3, gdy wykorzystywane jest 80% wyprodukowanego ciepła dla średniej prędkości wiatru 5 m/s żaden rozpatrywany przypadek nie można uznać za opłacalny ekonomicznie. Co prawda dla elektrowni o mocy 8 MW IRR minimalnie jest wyższe od przyjętej stopy dyskonta (IRR = 5,46%, natomiast  $r = 5,26\%$ ) to jednak biorąc pod uwagę jeszcze zdyskontowany czas zwrotu kapitału, który jest równy około 19,7 lat, inwestycja ta balansuje na granicy opłacalności. Natomiast dla średniej prędkości wiatru 6 m/s, a już zdecydowanie dla 7 m/s elektrownie hybrydowe pracujące według wariantu 3 są opłacalne lub bardzo opłacalne ekonomicznie.
- rozpatrując elektrownie hybrydowe pracujące według wariantu 4, gdzie wykorzystanie ciepła wynika z zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków dla prędkości wiatru 5 i 6 m/s dla żadnej z rozpatrywanych wielkości elektrowni inwestycja nie osiągnęła dodatniego efektu ekonomicznego. Dopiero dla prędkości 7 m/s dla mocy elektrowni równych 4 i 8 MW NPV jest wyższe od zera, co może sugerować, iż inwestycja się opłaca. Dla pozostałych analizowanych mocy NPV jest niższe od zera. Taki stan rzeczy wynika z tego, że zbyt mała ilość ciepła jest zagospodarowana, co przekłada się na obniżenie wpływów ze sprzedaży samego ciepła, jak również obniża dochody ze sprzedaży żółtych certyfikatów powiązanych z wysokosprawną kogeneracją.

Reasumując, efektywność kojarzenia elektrowni wiatrowych z układami kogeneracyjnymi zasilanymi gazem ziemnym wysokometanowym z punktu widzenia ekonomicznego nie jest zbyt korzystne. Dopiero przy średniej prędkości wiatru wynoszącej 6 m/s i przy wykorzystaniu ciepła na poziomie 80% elektrownie hybrydowe można uznać za opłacalne ekonomicznie. Jednak zarówno prędkość wiatru, jak i stopień zagospodarowania wyprodukowanego ciepła znacznie ograniczają możliwość powstawania tego typu układów.

**Biogaz rolniczy + pozaklasowe gazy z separacji gazu surowego**

Na potrzeby niniejszej symulacji założono, iż biogaz rolniczy wzbogacany będzie gazem uzyskiwanym z separatora gazu surowego z odwiertu zlokalizowanego na obszarach rolniczych, w których funkcjonują biogazownie. W tabeli 2 podano przykładowe składy biogazu i gazu z separatora.

**Tabela 2.** Przykładowe składy gazu z separatora i biogazu oraz ich mieszanin

**Table 2.** Examples of gas compositions from the separator and biogas and their mixtures

| Składnik gazu            | Skład gazu separatorowego |       | Skład biogazu |   | Proporcje mieszania |  |
|--------------------------|---------------------------|-------|---------------|---|---------------------|--|
|                          | G1                        | G2    | G3            | 0,32 (G1) + 0,68 (G2)   0,22 (G1) + 0,78 (G3) |                     |  |
|                          |                           |       |               | parametry po zmieszaniu                       |                     |  |
|                          | [%]                       |       |               |   |                     |  |
| N <sub>2</sub>           | 0,24                      | 5,00  | 2,00          | 3,48  | 1,61                |  |
| CO <sub>2</sub>          | 0,53                      | 45,00 | 23,00         | 30,77   | 18,06               |  |
| C <sub>1</sub>           | 11,49                     | 50,00 | 75,00         | 37,68   | 61,03               |  |
| C <sub>2</sub>           | 10,71                     | –     | –             | 3,43  | 2,36                |  |
| C <sub>3</sub>           | 18,85                     | –     | –             | 6,03  | 4,15                |  |
| C <sub>4</sub>           | 23,29                     | –     | –             | 7,45  | 5,12                |  |
| C <sub>5</sub>           | 21,97                     | –     | –             | 7,03  | 4,83                |  |
| C <sub>6</sub>           | 8,82                      | –     | –             | 2,82  | 1,94                |  |
| C <sub>7+</sub>          | 4,10                      | –     | –             | 1,31  | 0,90                |  |
| Ws [MJ/m <sup>3</sup> ]* | 86,16                     | 18,75 | 31,92         | 45,02   | 47,54               |  |
| Hs [MJ/m <sup>3</sup> ]* | 122,57                    | 18,88 | 28,32         | 52,06   | 48,86               |  |

\* Dla warunków: 15°C i 1013,25 mbar

Zakładając wydajność strumienia gazu z separacji w ilości 35 m<sup>3</sup>/h oraz fakt, że w wyniku zmieszania go z biogazem chcemy uzyskać gaz o liczbie Wobbego zbliżonej możliwie blisko do minimalnej liczby Wobbego dla gazu ziemnego grupy E tzn. do  $W_s = 43,7 \text{ MJ/m}^3$  (EN 437:2009) powyższą ilość gazu z separatora należy zmieszać z:

- 74,4 m<sup>3</sup>/h biogazu o zawartości metanu równej 50%;
- 124,1 m<sup>3</sup>/h biogazu o zawartości metanu równej 75%.

W wyniku zmieszania uzyskujemy 109,4 m<sup>3</sup>/h mieszaniny gazów G1 + G2 lub 159,1 m<sup>3</sup>/h mieszaniny gazów G1 + G3, co pozwala na uzyskanie w układzie kogeneracyjnym o sprawności 30%, przystosowanym do zasilania gazem ziemnym, odpowiednio 0,47 MW lub 0,64 MW energii elektrycznej i dwa razy tyle energii cieplnej. Podana ilość gazu separatorowego to ilość towarzysząca odwiertowi o wydajności około 200 m<sup>3</sup>/h gazu oczyszczonego.

Możliwości wykorzystania tak wzbogaconego biogazu gazami wysokokalorycznymi zostały przedstawione w prezentowanych badaniach (Wojtowicz, 2014).

Badania te pokazały, że urządzenia przystosowane do gazu wysokometanowego lub zaazotowanego pracowały poprawnie i bezpiecznie przy zasilaniu ich podobnymi mieszankami biogazu. Szczególnie ciekawe są wyniki badań różnych palników kuchennych płyt gazowych przystosowanych do zasilania gazem grupy E, podczas których to badań były one zasilane mieszaniną biogazu i gazu płynnego propan-butan o parametrach pozwalających na ulokowanie liczby Wobbego tej mieszaniny

w normowym zakresie gazu E. Parametry tej mieszaniny przedstawiono w tabeli 3, a wyniki badań urządzeń z użyciem tego gazu pokazano w tabelach 4 i 5.

Uzyskane wyniki (tab. 4, 5) pokazują, że parametry spalania badanej mieszaniny biogaz(B)-P-B są podobne do parametrów spalania gazu odniesienia G20.

Analizując te wyniki można stwierdzić, że liczba Wobbego dla tego przypadku dobrze oddaje podobieństwo porównywanych gazów. Wyższa liczba Wobbego  $W_s$  gazu odniesienia G20 (równa 50,72 MJ/m<sup>3</sup>) skutkuje wyższą mocą palników, a z kolei wyższe moce palników generują wyższe zawartości CO w spalinach, przy czym należy zauważyć, że wszystkie

te zawartości mieszczą się w limicie dopuszczalnym normą (EN 30-1-1:2013), wynoszącym 1000 ppm.

**Tabela 3.** Parametry mieszaniny biogazu i propanu-butanu tworzonej jako zamiennik gazu grupy E

**Table 3.** Parameters of a mixture of biogas and propane-butane formed as a gas substitute for group E

| Skład gazu                        | metan           | [% obj.]                                    | 49,8  |
|-----------------------------------|-----------------|---|-------|
|                                   | etan            |   | –     |
|                                   | propan          |   | 11,8  |
|                                   | butan           |   | 11,8  |
|                                   | dwutlenek węgla |   | 26,6  |
| Ciepło spalania, $H_s$            |                 | [MJ/m <sup>3</sup> ]                        | 47,53 |
| Wartość opałowa, $H_i$            |                 |   | 43,42 |
| Liczba Wobbe'go (górna), $W_s$    |                 |   | 45,04 |
| Liczba Wobbe'go (dolna), $W_i$    |                 |   | 41,14 |
| Gęstość, $\rho$                   |                 | [kg/m <sup>3</sup> ]                        | 1,439 |
| Gęstość względna, $d$             |                 | –   | 1,114 |
| Proporcje mieszania P-B i biogazu |                 | [m <sup>3</sup> P-B/m <sup>3</sup> biogazu] | 0,31  |

Dla warunków 15°C i 1013,25 mbar

**Tabela 4.** Porównanie obciążeń cieplnych skorygowanych ( $Q_c$ ) w [W] przy  $p_{nom}$

**Table 4.** Comparison of corrected thermal loads ( $Q_c$ ) in [W] at  $p_{nom}$

| Oznaczenie gazu |        | G20  | B + P – B <sub>(E)</sub> |
|-----------------|--------|------|--------------------------|
| Palnik          | duży   | 2367 | 1979                     |
|                 | średni | 1362 | 1169                     |
|                 | mały   | 539  | 451                      |

**Tabela 5.** Porównanie jakości spalania przy  $p_{max}$  – zawartość CO w przeliczeniu na suche nierozcieńczone spaliny [ppm]

**Table 5.** Comparison of combustion quality at  $p_{max}$  – CO content calculated as dry air free combustion gases [ppm]

| Oznaczenie gazu |        | G20 | B + LPG <sub>(E)</sub> |
|-----------------|--------|-----|------------------------|
| Palnik          | duży   | 133 | 54                     |
|                 | średni | 47  | 38                     |
|                 | mały   | 64  | 62                     |

## Wnioski

1. Przykład synergii energii wiatru i energii gazu ziemnego może być wykorzystywany do analizy możliwości podobnego wykorzystania gazu do wyrównania strumienia energii uzyskiwanego ze źródeł odnawialnych zależnych od warunków pogodowych, takich jak słońce czy fale morskie. W przykładzie tym celem było dopasowanie ilości produkowanej energii do aktualnych potrzeb, czyli podniesienie sterowalności produkcją energii. Przeciwnieństwem powyższego sposobu podwyższenie efektywności OZE jest budowa instalacji o możliwości zaspokojenia potrzeb energetycznych przy minimalnych warunkach pogodowych i przetwarzanie nadwyżek energii w pozostałych warunkach na czynniki mogące być magazynem energii (na przykład wodór). Konieczna w tym przypadku droga infrastruktura wymaga wnikliwej analizy efektywności zarówno energetycznej, jak i ekonomicznej.
2. Należy zwrócić uwagę na fakt, że OZE występują w każdej lokalizacji, ale w nie każdej mogą być efektywnie wykorzystywane.
3. Synergia biogazu z gazami kopalnymi ukazuje możliwość stabilizowania parametrów energetycznych paliwa w przypadku, gdy wszelkiego rodzaju biogazy powstają z materiałów odnawialnych lub odzyskiwanych o nierównomiernym składzie, co wpływa na przebieg reakcji chemicznych czy procesów biologicznych, w wyniku których uzyskiwany jest biogaz. Dodatkową zaletą tej synergii jest możliwość wykorzystania w tym celu gazów kopalnych

o parametrach odbiegających od parametrów gazów sieciowych (Holewa et al., 2012). Podobny wniosek dotyczy wykorzystania biogazu wysypiskowego (Dudek et al., 2011; Zaleska-Bartosz, 2014).

4. Przedstawione w artykule badania pokazały, że popularne domowe urządzenia gazowe mogą być bezpiecznie użytkowane w stosunkowo dużym zakresie zmienności parametrów zasilającego je gazu, co pozwala na efektywne użytkowanie różnych mieszanin biogazu z gazami kopalnymi.

## Literatura

- Urząd Regulacji Energetyki: <https://www.ure.gov.pl/pl/oze/potencjal-krajowy-oze/5753,Moc-zainstalowana-MW.html> (dostęp: 5.02.2019).
- Soliński I., Ostrowski J., Soliński B., 2008. Wiatrowo-gazowe elektrownie hybrydowe. *Polityka Energetyczna*, 11(2): 121–128.
- Wojtowicz R., 2014. Ocena wymienności mieszanek biogazu rolniczego z LNG lub LPG z gazami drugiej rodziny grupy E i Lw metodą Weavera. *Gaz, Woda, Technika Sanitarna*, 11: 420–425.
- Holewa J., Kukulska-Zajac E., Pęgielska M., 2012. Analiza możliwości wprowadzania biogazu do sieci przesyłowej. *Nafta-Gaz*, 8: 523–529.
- Zaleska-Bartosz J., 2014. Gaz składowiskowy jako źródło energii. *Nafta-Gaz*, 12: 932–937.
- Dudek J., Klimek P., Flak K., 2011. Optymalizacja procesu wytwarzania energii odnawialnej na składowisku odpadów komunalnych Barycz w Krakowie – modernizacja stacji przesyłowej biogazu. *Nafta-Gaz*, 8: 568–571.

## Akty prawne i normatywne

- EN 437:2003 + A1:2009 Test gases – Test pressures – Appliance categories.
- EN 30-1-1:2008 + A3:2013 Domestic cooking appliances burning gas – Part 1-1: Safety – General



Dr inż. Zdzisław GEBHARDT  
Adiunkt w Zakładzie Użytkowania Paliw  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [zdzislaw.gebhardt@inig.pl](mailto:zdzislaw.gebhardt@inig.pl)



Mgr inż. Robert WOJTOWICZ  
Kierownik Zakładu Użytkowania Paliw  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [robert.wojtowicz@inig.pl](mailto:robert.wojtowicz@inig.pl)